

## 基于菱形光纤布拉格光栅传感阵列的声发射定位技术

吕珊珊<sup>1,2</sup>, 耿湘宜<sup>2</sup>, 张法业<sup>2</sup>, 肖航<sup>2</sup>, 姜明顺<sup>2</sup>, 曹玉强<sup>2</sup>, 隋青美<sup>2</sup>

(1. 山东大学海洋研究院, 山东 济南 250100; 2. 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:** 声发射技术是结构损伤检测的重要手段, 声发射源定位是损伤检测的首要环节。时差定位技术具有快速、高效、精确的特点, 以此设计了由菱形阵列光纤布拉格光栅(FBG)传感器构成的声发射定位系统。采用小波变换和传统阈值法提取特征信号, 结合互相关法获得传感器间的信号到达时差, 然后根据几何定位模型求解非线性方程组得到声源可能存在的位置, 最后根据时差的正负特性进一步确定声源的准确位置, 有效避免了伪声源的情况。在铝合金板上, 以对角线为 48 cm×48 cm 的监测区域进行了 10 组测试实验验证, 平均误差为 1.29 cm。

**关键词:** 声发射技术; 光纤布拉格光栅; 小波变换; 互相关; 时差定位

**中图分类号:** TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1222005

## Acoustic emission location based on diamond FBG sensor array

Lv Shanshan<sup>1,2</sup>, Geng Xiangyi<sup>2</sup>, Zhang Faye<sup>2</sup>, Xiao Hang<sup>2</sup>, Jiang Mingshun<sup>2</sup>, Cao Yuqiang<sup>2</sup>, Sui Qingmei<sup>2</sup>

(1. Institute of Marine Science and Technology, Shandong University, Jinan 250100, China;

2. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** Acoustic emission(AE) technology is an important method for structural damage detection, and AE source location is the most important part of the damage detection. The TDOA location method has the advantages of fast, high efficient and more accurate. An acoustic emission location system based on diamond Fiber Bragg Grating (FBG) sensor array was designed. Wavelet transform and traditional threshold method were used to extract feature signal, and the cross-correlation method was used to obtain the arrival time difference between different sensors. Then, the possible AE source was determined by solving nonlinear equations of the geometric model. Finally, the actual AE source was determined according to the feature of time difference. This location system can effectively avoid the pseudo AE source. The 10 groups of test data were carried out in the monitoring area with the diagonal of 48 cm×48 cm of the aluminum alloy plate, and the average error was 1.29 cm.

**Key words:** acoustic emission technology; FBG; wavelet transform; cross-correlation; time difference location

收稿日期: 2017-04-05; 修订日期: 2017-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(61174018); 山东大学基本科研业务费(2014YQ009, 2016JC012, 2016WLJH30)

作者简介: 吕珊珊(1993-), 女, 硕士生, 主要从事光纤传感定位及损伤识别技术方面的研究。Email: 17865122835@163.com

导师简介: 曹玉强(1963-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事生产过程计算机控制系统智能化测控仪器及自动化装置方面的研究。  
Email: caoyuqiang@hotmail.com

## 0 引言

声发射技术作为一种无损检测技术,已在石油化学、电力工业、铁路、土木和矿山工程、航空航天等领域获得广泛应用<sup>[1-2]</sup>。作为声发射技术的核心,声发射定位技术是实验测试和应用中的研究热点。

对于突发信号的声发射源定位算法主要分为时差定位和区域定位<sup>[3]</sup>。相比于区域定位,时差定位能更精确的确定声源位置。Dirk Aljets 等人<sup>[4]</sup>利用三角形传感阵列模型,建立信号到达不同传感器间的时差样本库,将得到的测试信号时间差与样本库数据进行匹配实现声源定位。Surgeon 和 Wavers 等人<sup>[5]</sup>借助小波变换,利用同一信号的不同模态到达时差和对应的群速度,实现了单传感器线定位。然而在实际定位应用中,除传感器的测量精度外,传感器的质量、尺寸等也是重要考虑因素。由于光纤光栅传感器具有体积小、重量轻、传输损耗小、易于组网等特点。

近年来,对光纤光栅传感器及其在声发射技术方面的研究越来越多。Edgar Mendoza 等人<sup>[6]</sup>建立了光纤声发射传感系统(FAESense™)用于复合材料飞机结构的实时监测、定位以及损伤识别。Masanori Takuma 等人<sup>[7]</sup>通过比较压电传感器的性能,设计了一种圆柱型光纤光栅传感器(Cylinder-FBG)应用于声发射检测。Tao Fu 等人<sup>[8]</sup>建立了一种基于光纤传感阵列的人工神经网络系统用于定位研究,获得了较高的定位效果,最大定位误差为 6.4 mm。赛耀樟等人<sup>[9]</sup>利用 7 个 FBG 传感器组成的传感阵列,利用小波变换提取窄带信号,提出了一种最小方差无失真响应的定位方法,平均误差为 7.2 mm。

综上所述,声发射定位方法的选择与建立的实际定位模型有关,文中基于铝合金板的各向同性性质,以钢球自由落体撞击铝合金板作为声发射源激励,用小波变换及传统阈值法对 FBG 传感器接收到的原始信号进行去噪并提取特征信号,再用互相关算法对特征信号求取时差,最后基于菱形传感器阵列模型对声源进行定位。

## 1 系统构建

### 1.1 FBG 应变原理

FBG 传感基本原理为:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: $\lambda_B$  为布拉格光栅反射波长; $n_{\text{eff}}$  为光纤的有效折射率; $\Lambda$  为光栅周期。在不考虑温度影响的情况下,声发射产生的应力波作用于 FBG 后,应力波会对其有效折射率  $n_{\text{eff}}$  和光栅周期  $\Lambda$  进行调制,从而使反射波长  $\lambda_B$  发生变化。

声发射产生的应力波作用于 FBG 时,光栅轴向受到非均匀应变场作用,则公式(1)可改写为:

$$\begin{cases} \lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda_0(1+a\varepsilon_{\text{AE}}) \\ a = 1 - \frac{1}{2}n_{\text{eff}}^2[p_{12} - \nu(p_{11} - p_{12})] \end{cases} \quad (2)$$

式中: $p_{11}$  和  $p_{12}$  为有效弹光系数; $\nu$  为光纤的泊松系数; $n_{\text{eff}}$  和  $\Lambda_0$  分别是初始状态下的有效折射率和周期; $\varepsilon_{\text{AE}}$  为应力波产生的应变场。

### 1.2 声发射定位系统搭建

声发射定位系统框图和实物图如图 1 和图 2 所示。为实现声发射信号的快速解调,利用 ASE 光源线性段作为边缘滤波器,结合边沿滤波解调原理构建光纤光栅解调系统,其工作示意图如图 1 中虚框部分所示。当声发射信号作用于 FBG 引起其反射峰出现漂移  $\Delta\lambda$  时,由于 ASE 光源斜边滤波的调制,反射峰的强度产生相应变化。这种变化通过光电转换及放大电路转化成电压信号变化,最后,经过数据处理单元滤波处理后在示波器显示信号波形。

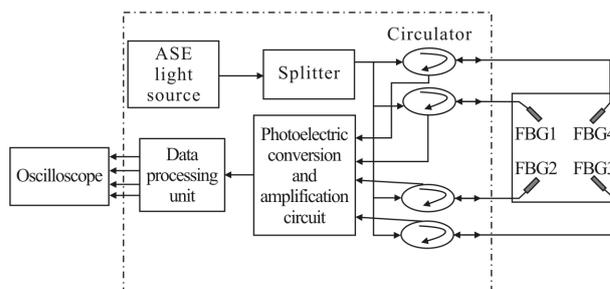


图 1 声发射定位系统框图

Fig.1 Diagram of AE localization system

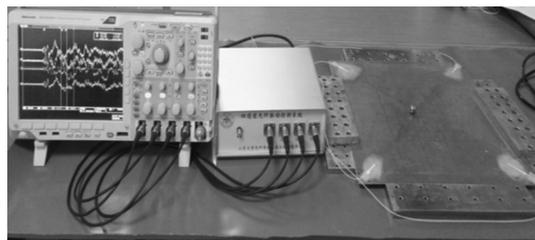


图 2 声发射定位系统实物图

Fig.2 Pictorial diagram of AE location system

系统中使用的 ASE 光源的光谱图如图 3 所示。将 FBG1~FBG4 的波长均选择在斜率最大的 1 533~1 536 nm 单调区间内,光栅中心波长选定为 1 534 nm。

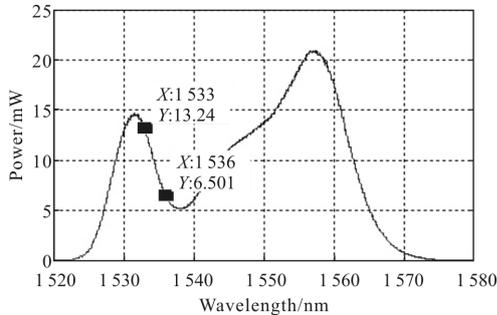


图 3 ASE 光源光谱图  
Fig.3 ASE laser spectrum

传感器位于铝合金板的四角,中心波长及粘贴位置见表 1。采用质量为 26 g 的钢球作为声发射模拟装置,以自由落体的方式进行垂直冲击,冲击高度为 260 mm,对应的冲击能量为 0.065 J,冲击速度为 2.24 m/s。

表 1 FBG 传感器中心波长及粘贴位置

Tab.1 Wavelength of FBG sensors and attaching position

Sensor	Wavelength/nm	Location/mm
FBG1	1 534.552	(-240, 0)
FBG2	1 534.586	(0, -240)
FBG3	1 534.565	(240, 0)
FBG4	1 534.577	(0, 240)

### 1.3 菱形阵列定位模型

如图 4 所示,传感器 FBG1~FBG4 组成菱形阵列<sup>[10]</sup>,FBG1 和 FBG3 位于 X 轴上,FBG2 和 FBG4 位于 Y 轴上。当监测区域内一点受到撞击时,设声源到达两组传感器的时间差分别为  $\Delta t_x$  和  $\Delta t_y$ ,即  $\Delta t_x=t_1-t_3$ ,  $\Delta t_y=t_2-t_4$ 。则声源位于由参数  $\Delta t_x$  和  $a$ 、 $\Delta t_y$  和  $b$  分别确定的双曲线  $l_1$  和  $l_2$  的交点  $Q(x,y)$  处。设波速为  $V$ ,则可得声源坐标:

$$\begin{aligned} x &= \text{sgn}(\Delta t_x) \frac{l_x}{2a} \left[ l_x + 2\sqrt{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + y^2} \right] \\ y &= \text{sgn}(\Delta t_y) \frac{l_y}{2a} \left[ l_y + 2\sqrt{\left(y - \frac{b}{2}\right)^2 + x^2} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $l_x=\Delta t_x \cdot V, l_y=\Delta t_y \cdot V$ ;  $a, b$  为菱形阵列对角线的长度。

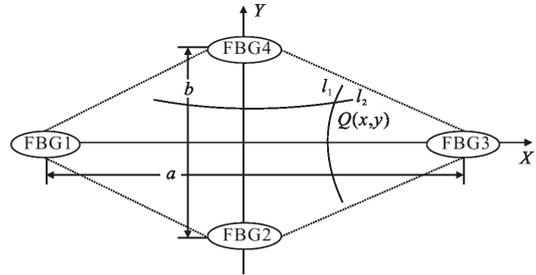


图 4 菱形阵列定位模型

Fig.4 Diamond array location model

## 2 实验及数据分析

### 2.1 静态信号及频谱分析

声发射定位实验是在 50 cm×50 cm 的铝合金板上进行的,确定对角线为 48 cm×48 cm 的菱形范围为监测区域,即公式(3)中的参数  $a=b=0.48$  m。采样频率设置为 2.5 MHz,采样时长为 4 ms。

当无钢球撞击事件发生时,传感器采集到的静态噪声信号及其 FFT 频谱如图 5 所示,由图可知,噪声信号有一个 0.006 V 的直流分量,其它频率范围在 0~100 kHz 的噪声信号幅值相比其他频段噪声信号幅值较高,但均低于 0.002 V。

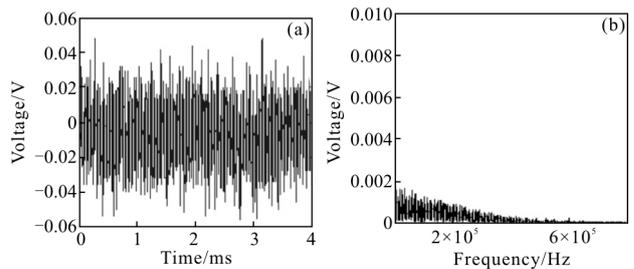


图 5 静态信号及频谱图

Fig.5 Static signal and spectrum

### 2.2 小波变换提取特征信号

与傅里叶变换相比,小波变换是一个时间和频率的局域变换,通过伸缩和平移等运算功能将信号数据分割成不同的频率成分,然后再根据分解方法研究在对应尺度下的信号成分。

由于声发射波在板结构中传播时存在频散效应<sup>[11]</sup>及边缘效应,时差和波速是声发射定位所需的关键的两个参数,但是频散效应严重影响了这两个

参量的提取和计算。因此引入连续小波变换用于提取声发射信号的窄带信号，将窄带信号用于声发射定位，从而减小频散效应的影响。对于任意的函数  $f(t) \in L^2(R)$  的连续小波变换 (Continue Wavelet Transform, CWT):

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a,b}^*(t) dt = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4)$$

式中：“\*”为函数的共轭； $\psi(t)$ 为母小波函数； $\psi_{a,b}(t)$ 为经过伸缩和平移后的小波函数； $W(a, b)$ 为小波变换系数。

考虑到声发射波的边缘效应，截取声发射原信号的前 3 个周期信号进行着重分析并对其进行傅里叶变换，结果如图 6 所示。由分析结果可知，截取的信号频率主要集中在 5~10 kHz。因此，用连续小波变换主要提取 5~10 kHz 的窄带信号。

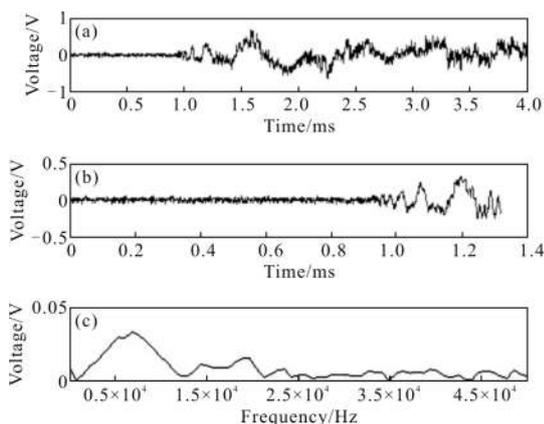


图 6 截取信号及频谱

Fig.6 Extracted signal and spectrum

用确定的小波基(‘sym8’小波)及参数对原始信号进行小波变换，然后设定大于噪声平均幅值的 3 倍值为阈值(本次实验设置阈值  $h=0.8$  V)。从信号大于阈值的时刻点向后延迟 400 个采样点(0.16 ms)作为特征信号的终止点，将 0 时刻到终止点的信号作为特征信号用于后续工作中时差、波速及定位实验中坐标的计算。如图 7 所示，其中图 7(a)为声发射

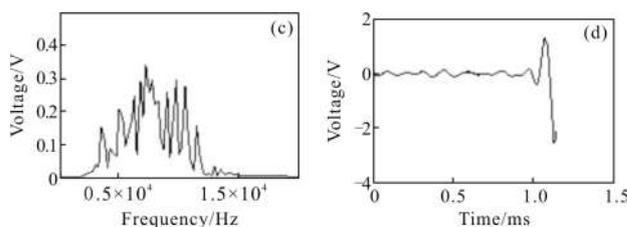
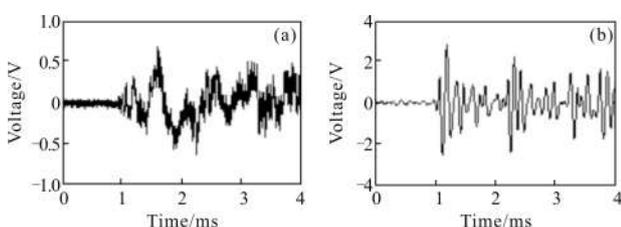


图 7 原始信号及特征信号

Fig.7 Original signal and characteristic signal

原始信号，图 7(b)为小波提取的窄带信号，图 7(c)为窄带信号的频谱图，图 7(d)为通过阈值法提取的特征信号。

### 2.3 互相关法求时差及声源定位

对于连续信号  $f(x)$ 和  $g(x)$ 来说，互相关定义为：

$$(f \cdot g)(x) = \int f^*(t)g(x+t)dt \quad (5)$$

其中，积分是在整个可能的  $t$  区域积分。

对于离散信号有：

$$(f \cdot g)_i = \sum_j f_j^* \cdot g_{i+j} \quad (6)$$

其作用机理相当于对一系列信号平移  $i$  个单位后再与另一列信号做乘积。因此得到互相关函数的最大值，其所对应的时间即为两信号间的时差，该实验就是根据这种原理对传感器间时差进行计算的。

用线定位时差技术，根据已知发射源位置坐标，并利用信号互相关求得的时差计算波速，原理如图 8 所示。

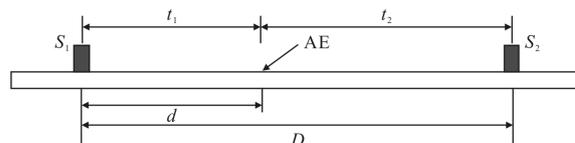


图 8 线定位求波速

Fig.8 Line location for the wave velocity

已知两传感器之间的距离  $D$  及声源位置  $d$ ，则波速  $V=(D-2d)/(t_2-t_1)$ ，因此对位于坐标轴上已知坐标位置的一点进行 10 次撞击实验，利用上式波速求解公式进行计算，取平均值。实验中求得 5~10 kHz 频率下的声发射信号波速  $V=767$  m/s。

用线定位求得的波速，结合互相关算法求得的两坐标轴上的时差，利用公式(3)对监测区域内的 10 个监测点进行声发射定位，定位结果如图 9 所示，最小

径向误差为 0.21 cm,最大径向误差为 2.3 cm,平均径向误差为 1.29 cm。

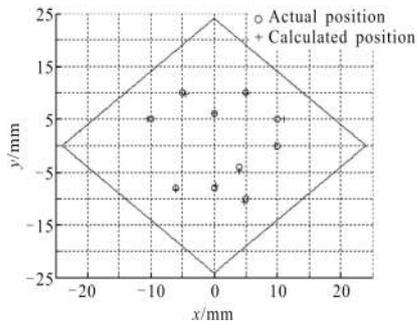


图 9 定位结果

Fig.9 Localization results

### 3 结论

文中利用小波变换和互相关算法以及传统阈值法,结合光纤光栅传感系统,实现了铝合金板的声发射平面定位。利用小波变换和阈值法提取特征信号,然后结合互相关算法计算声源到达传感器间的时差,再利用线定位算法计算波速,最后根据波速、时差及已知传感器位置坐标实现平面定位。实验中十次随机定位结果显示,定位的平均径向误差为 1.29 cm,其中有 8 次定位径向误差在 2 cm 内,证实了本方法的可行性,实现了基于小波变换和互相关算法的声发射定位。

### 参考文献:

[1] Hu Changyang, Yang Gangfeng, Huang Zhenfeng, et al. AE technology and application in the test [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2008, 35(6): 1-3. (in Chinese)  
 胡昌洋, 杨钢锋, 黄振峰, 等. 声发射技术及其在检测中的应用[J]. 计量与测试技术, 2008, 35(6): 1-3.

[2] Yang Ruifeng, Ma Tiehua. A study on the application of acoustic emission technique[J]. *Journal of North University of China(Natural Science Edition)*, 2006, 27(5): 456-461. (in Chinese)  
 杨瑞峰, 马铁华. 声发射技术研究及应用进展 [J]. 中北大学学报(自然科学版), 2006, 27(5): 456-461.

[3] Jin Zhongshan, Liu Shifeng, Geng Rongsheng, et al. Location of acoustic emission source on curved surfaces and three-

dimension structures[J]. *Nondestructive Testing*, 2002, 24(5): 205-211. (in Chinese)  
 金钟山, 刘时风, 耿荣生, 等. 曲面和三维结构的声发射源定位方法[J]. 无损检测, 2002, 24(5): 205-211.

[4] Aljets D, Chong A, Wilcox S, et al. Acoustic emission source location on large plate-like structures using a local triangular sensor array [J]. *Mechanical System and Signal Processing*, 2012, 30(7): 91-102.

[5] Surgeon M, Wavers M. One sensor linear location of acoustic emission events using plate wave theories [J]. *Materials Science and Engineering*, 1999, A265(1-2): 254-261.

[6] Mendoza E, Prohaska J, Kempen C, et al. In-flight fiber optic acoustic emission sensor (FAESense™) system for the real time detection, localization, and classification of damage in composite aircraft structures [J]. *Optical Sensors and Interconnect for Harsh Environment*, 2013, 8720 (29): 540-544.

[7] Takuma M, Hisada S, Saitoh K, et al. Acoustic emission measurement by fiber Bragg grating glued to cylindrical sensor holder[J]. *Advance in Material Science & Engineering*, 2014, 2014: 274071.

[8] Fu T, Zhang Z, Liu Y, et al. Development of an artificial neural network for source localization using a fiber optic acoustic emission sensor array [J]. *Structural Health Monitoring*, 2015, 14(2): 168-177.

[9] Sai Yaozhang, Jiang Mingshun, Sui Qingmei, et al. Acoustic emission location based on FBG array and MVDR algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(11): 3012-3017. (in Chinese)  
 赛耀樟, 姜明顺, 隋青美, 等. 基于光纤光栅阵列和 MVDR 算法的声发射定位 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(11): 3012-3017.

[10] Shen Gongtian, Geng Rongsheng, Liu Shifeng. Acoustic emission source location [J]. *Nondestructive Testing*, 2002, 24(3): 114-117. (in Chinese)  
 沈功田, 耿荣生, 刘时风. 声发射源定位技术 [J]. 无损检测, 2002, 24(3): 114-117.

[11] Mostafapour A, Davoodi S, Ghareaghaji M. Acoustic emission source location in plates using wavelet analysis and cross time frequency spectrum[J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(8): 2055-2062.